

## Status of Direct-Detection Experiments in Korea on Dark Matter

Hyun Su LEE\*

Center for Underground Physics, Institute for Basic Science (IBS), Daejeon 34047, Korea

(Received 2 July 2016 : revised 12 July 2016 : accepted 12 July 2016)

The direct detection of dark matter is a crucial component in the search for the Universe's missing matter. In Korea, this research was started by Professors Sun-Kee Kim, Yeoungduk Kim, and Hong-Joo Kim, who in 1997 discussed the possibility of a dark matter search using CsI(Tl) crystals. In 1999, the Korea Invisible Mass Search (KIMS) collaboration was formed at CheongPyung Underground Laboratory. The KIMS collaboration secured a deeper place, the Yangyang Underground Laboratory, in 2003 and started its dark-matter search experiment with CsI(Tl) crystals. Since 2013, the research has been extended to develop ultra-low-background NaI(Tl) crystals, as well as cryogenic detectors, for the dark-matter search. In this article, we review the achievements of the dark-matter search experiment, as well as the future plan, at KIMS.

PACS numbers: 29.40.Mc, 85.60.Ha

Keywords: Dark matter, WIMP, Scintillator

## 한국 암흑물질 직접탐색 실험의 현황

이현수\*

기초과학연구원 지하실험연구단, 대전 34047, 대한민국

(2016년 7월 2일 받음, 2016년 7월 12일 수정본 받음, 2016년 7월 12일 게재 확정)

대부분의 우주 구성 질량으로 생각되는 암흑물질을 지구에서 직접 발견하는 것은 과학적으로 매우 흥미롭고 중요한 과제이다. 한국에서는 1997년 김선기, 김영덕, 김홍주 교수를 중심으로 CsI(Tl) 검출기를 암흑물질 탐색에 사용하는 연구를 시초로, 1999년 청평 지하실험실을 구축하고 KIMS (Korea Invisible Mass Search) 실험을 시작하였다. KIMS 연구진은 2003년부터 심도가 깊은 양양 지하실험실로 이전하여 CsI(Tl) 검출기를 이용한 본격적인 실험을 진행하였으며 2013년부터 극저방사능 NaI(Tl) 검출기 및 저온 검출기 개발에 뛰어들어 암흑물질 직접 탐색에 매진하고 있다. 본 논문에서는 KIMS 실험이 현재까지 진행한 암흑물질 탐색 실험의 성과와 향후 계획에 대해 논의하고자 한다.

PACS numbers: 29.40.Mc, 85.60.Ha

Keywords: 암흑물질, WIMP, 섬광검출

\*E-mail: [hyunsulee@ibs.re.kr](mailto:hyunsulee@ibs.re.kr)



## I. 서론

암흑물질의 존재는 다양한 천문학적 관측을 통해 확인되고 있다 [1–4]. 매우 정밀하게 관측된 여러 천문학적 현상을 잘 설명하기 위해서는 암흑물질이 속도가 느리고 차가운 입자일 가능성이 매우 크다 [5]. 이 가운데 고 이휘소 박사의 아이디어에서 시작한 약하게 상호작용하는 무거운 입자, WIMP (weakly interacting massive particle)는 초대칭 이론을 비롯한 새로운 물리 (beyond standard model) 이론에서 예측되기 때문에 가장 강력한 암흑물질 후보이다 [6,7].

WIMP 입자의 반응은 매우 희귀하지만, 검출기의 핵자와 결맞는 탄성충돌을 할 수 있고, 이때 되 튕겨진 핵의 운동에너지를 측정하여 WIMP 입자를 검출하는 것이 가능하다. WIMP 입자와 일반 물질 사이의 반응은 매우 드물다. 이에 반해 상대적으로 매우 많은 양의 배경 방사능이 주변에 존재한다. 특히 높은 에너지의 우주선 (cosmic ray) 입자로부터 생성된 고에너지 뮤온 (muon) 입자의 경우 지표면에서는 차폐할 수 없어 깊은 지하 실험실이 필수적이다. 현재 세계 유수의 연구진들이 고심도 지하 실험실을 구축하여 WIMP 탐색 실험을 진행하고 있다.

다양한 지하실험들 가운데 가장 흥미로운 결과를 보이는 연구그룹은 이탈리아에서 진행되고 있는 DAMA/LIBRA 실험이다. DAMA/LIBRA 그룹은 지난 20여 년간 250 kg의 NaI(Tl) 섬광 검출기를 이용하여 WIMP 입자의 반응을 탐색하고 있다. 특히 지구의 공전에 따라 1년 주기로 WIMP의 상대속도가 달라지는 현상을 이용하여 연간변조 신호 (annual modulation signal)를 분석하여,  $9.3\sigma$ 의 높은 신뢰도로 그 신호를 확인하였다고 발표하였다 [8]. 그러나, CDMS, LUX, XENON 실험 등에서는 이와 상반되는 결과를 얻어 궁금증을 더하고 있다 [9–11].

한국에서는 1997년 서울대에서 김선기, 김영덕, 김홍주 교수가 국내 고에너지 실험 기반 구축을 위해 의기투합하여 논의를 시작하였으며, 당시 Belle 실험에서 사용하던 CsI(Tl) 검출기를 테스트하며 암흑물질 탐색 연구를 시작하였다. 특히 1999년 부터 청평양수발전소에 지하실험실을 구축하였고, 2000년 과학기술부 창의연구진흥사업에 암흑물질탐색연구단 (단장: 김선기)이 선정되어 KIMS (Korea invisible mass search) 실험이 본격적으로 시작되었다. 청평양수발전소의 공간과 깊이 (400 m)가 문제되어 2003년부터 2배 더 깊은 양양 양수발전소로 실험실을 이전하면서 본 궤도에 오르게 된다 [12–14]. 2012년까지 KIMS 연구진은 극저 방사능의 CsI(Tl) 결정 검출기를 개발하여 암흑물질 탐색을 진행하였으며 [15–18], 2013년 기초과학연구원의 지하실험연구단 (단장: 김영덕)으로 선정된 후 NaI(Tl)

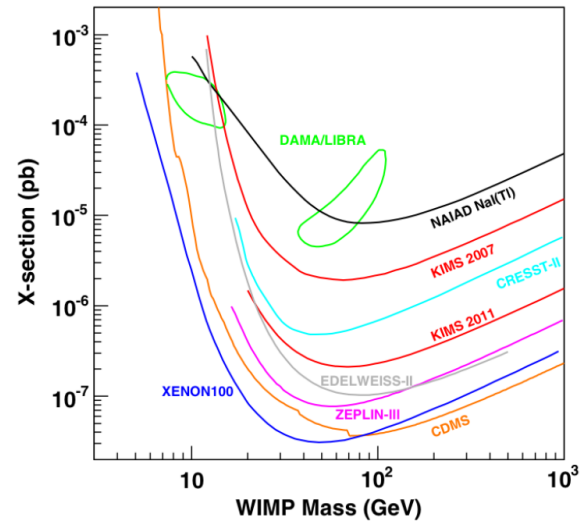


Fig. 1. (Color online) The 90% exclusion limits on spin-independent WIMP-nucleon cross section of the KIMS CsI experiment compared with other experiments [17].

검출기의 개발을 동시 진행하고 있다 [19–21]. 특히 지하 실험실의 공간을 확장하여 차세대 암흑물질 탐색 실험용 차폐시설을 완성하였다. 이 시설에 100 kg의 고순도 NaI 검출기를 설치하였고, 곧 DAMA/LIBRA 실험을 검증하기 위한 실험을 착수할 예정이다. 또한, 향후 낮은 질량의 암흑물질 탐색에 세계적인 경쟁력이 있는 검출기를 확보하기 위해 저온 검출기를 개발, 이에 관한 연구를 진행하고 있다. 본 논문에서는 KIMS 암흑물질 탐색 연구진의 현재까지 성과와 앞으로의 연구 방향에 대해 논의하고자 한다.

## II. KIMS CsI(Tl) 실험

KIMS 실험 그룹은 1997년 부터 DAMA/LIBRA 실험에서 사용하는 NaI(Tl) 결정과 유사한, 그러나 WIMP와의 산란단면적이 크고 섬광효율이 높은 CsI(Tl) 결정을 이용하여 암흑물질 탐색을 시작하였다 [12]. 다양한 CsI(Tl) 결정 검출기를 측정하여 주된 배경방사능이 결정 내부의  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ , 그리고  $^{134}\text{Cs}$ 임을 확인하였다 [13,22–24]. 꾸준한 연구와 실험을 통해 내부 방사능을 제거하는 방법을 개발하여 최종 12개의 고순도 CsI(Tl) 결정 검출기를 제작하였다. 700 m 깊이에 이르는 양양 지하 실험실에 납, 구리, 광물기름 등 약 40톤에 이르는 차폐체를 설치하고 고순도의 CsI(Tl) 결정 검출기를 설치하여 2009년부터 2012년까지 장기간의 실험을 성공적으로 수행하였다. 지금은 CsI(Tl) 결정 검출기의 업그레이드와 NaI(Tl) 결정 검출기 개발을 위해 잠시 운영을 중단한 상태이다.

Table 1. Specification of the NaI(Tl) crystals. The second column specifies the cylinder diameters and length in inches. The “Powder” acronyms are AS-B (AS-C): Alpha Spectra purified powder, SA-AG: Sigma-Aldrich Astro-Grade powder (reduced K content), SA-CG: Sigma-Aldrich Crystal-Growth powder, and AS-WSII: Alpha Spectra WIMP-ScintII grade powder. The names of the crystal growing companies are AS: Alpha-Spectra and BH: Beijing-Hamamatsu. The last two columns are the months the crystals were grown and transported to YangYang Underground Laboratory (Y2L).

Crystal	Size (D×L)	Powder	Company	T (Growth)	T (Y2L)
NaI-001	5'' × 7''	AS-B	AS	2011.9	2013.9
NaI-002	4.2'' × 11''	AS-C	AS	2013.4	2014.1
NaI-003	4.5'' × 3.5''	SA-AG	AS	2014.4	2014.9
NaI-004	4.5'' × 3.5''	SA-CG	AS	2014.3	2014.9
NaI-005	4.2'' × 11''	AS-WSII	AS	2014.7	2014.12
NaI-006	4.8'' × 8.8''	SA-CG	BH	2014.10	2015.1

Table 2. Background rates from internal radioactive contaminants in the NaI(Tl) crystals. A chain equilibrium was assumed for the interpretation of radioactivity measurements related to  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ . For “ $\alpha$  Rate”, each alpha particle is counted as one decay.

Crystal (unit)	$^{\text{nat}}\text{K}$ ( $^{40}\text{K}$ ) (ppb)	$^{238}\text{U}$ (ppt)	$^{232}\text{Th}$ (ppt)	$\alpha$ Rate (mBq/kg)	Light Yield (Photoelectrons/keV)
NaI-001	$40.4 \pm 2.9$	$< 0.02$	$< 3.19$	$3.29 \pm 0.01$	$15.6 \pm 1.4$
NaI-002	$48.1 \pm 2.3$	$< 0.12$	$0.5 \pm 0.3$	$1.77 \pm 0.01$	$15.5 \pm 1.4$
NaI-003	$25.3 \pm 3.6$	$< 0.14$	$0.46 \pm 0.07$	$2.43 \pm 0.01$	$13.3 \pm 1.3$
NaI-004	$> 116.7$	—	—	—	$3.9 \pm 0.4$
NaI-005	$40.1 \pm 4.2$	$< 0.04$	$0.19 \pm 0.01$	$0.48 \pm 0.01$	$12.1 \pm 1.1$
NaI-006	$> 127.1$	$< 0.05$	$8.90 \pm 0.04$	$1.53 \pm 0.01$	$4.4 \pm 0.4$

섬광 검출기의 경우 펄스 모양분석(PSD) 방법을 통해 핵의 여기 반응에 의한 암흑물질 신호와 전자의 여기 반응에 의한 배경방사능 신호를 구분할 수 있다. 특히 CsI(Tl) 검출기의 경우 NaI(Tl)에 비해 뛰어난 PSD 성능을 가지고 있음이 잘 알려져 있다. KIMS 그룹은 중성자 빔과 중성자 소스를 이용하여 이를 검증하였고 [25,26], 검출기 개발 과정에서 pilot, engineering 실험을 통해 얻은 데이터 그리고, 또 초기 1년 데이터를 PSD 분석 방법을 적용하여 WIMP 신호 탐색을 진행하였다 [15–17]. 가장 최근의 결과에서도 WIMP 신호를 관측하지 못하여 90% 신뢰 범위 한계선을 Fig. 1과 같이 얻었다 [17]. 이 결과는 DAMA/LIBRA의 관측 결과 특히 WIMP 질량이 100 GeV 근처의 높은 질량으로 해석하는 WIMP-Iodine 반응과는 모순되는 결과이다. KIMS 실험이 같은 Iodine을 사용하였기에 검출기에 연관된 여러 요소와 상관없이 DAMA/LIBRA 실험을 WIMP와 Iodine 사이의 반응에 의한 결과로 해석하는 이론은 제거하였다. 그러나, 여전히 WIMP와 Sodium의 반응에 의한 신호, 즉 낮은 질량의 WIMP에 대한 해석은 충분히 가능성이 남아 있다.

### III. KIMS NaI(Tl) 실험

KIMS 실험을 포함하여 많은 실험이 DAMA/LIBRA 실험과는 상반되는 결과를 보여주고 있지만, 실험에 사용한 검출기의 특성, WIMP 신호 분석 방법의 차이, 암흑물질에 대한 이론, 우주모형 등 다양한 변수가 존재하여 직접적인 비교를 어렵게 만들고 있다 [27,28]. 따라서 DAMA/LIBRA 실험과 같은 검출기를 사용하여 동일한 신호를 분석하는 다른 실험이 필요하다. 현재 KIMS [19–21]를 포함하여 ANAIS [29,30], DM-Ice [31,32], PICO [33], SABRE [34] 등 세계 유수의 연구진이 NaI 검출기를 이용하여 DAMA/LIBRA 결과의 이견 없는 검증에 뛰어든다.

다양하게 이뤄지고 있는 NaI 실험 성공의 열쇠는 DAMA/LIBRA에서 사용하는 검출기보다 우수한 성능의 NaI 검출기를 개발할 수 있는 가에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 이를 위해서는 NaI 검출기의 문턱에너지를 2 keV 이하로 낮추고, 또 배경방사능이 1 counts/kg/keV/day (dru) 이하의 빈도를 가지는 검출기 개발이 필수적이다. KIMS 연구진은 미국 Alpha Spectra, 중국 Beijing Hamamatsu 및 SICCAS사를 통해 고순도의 NaI 결정 검출기를 개발하고 테스트하였다. Table 1은 지금까지 개발하여 테스트 한 NaI 검출기중 일부의 리스트를 보여준다 [19–21].

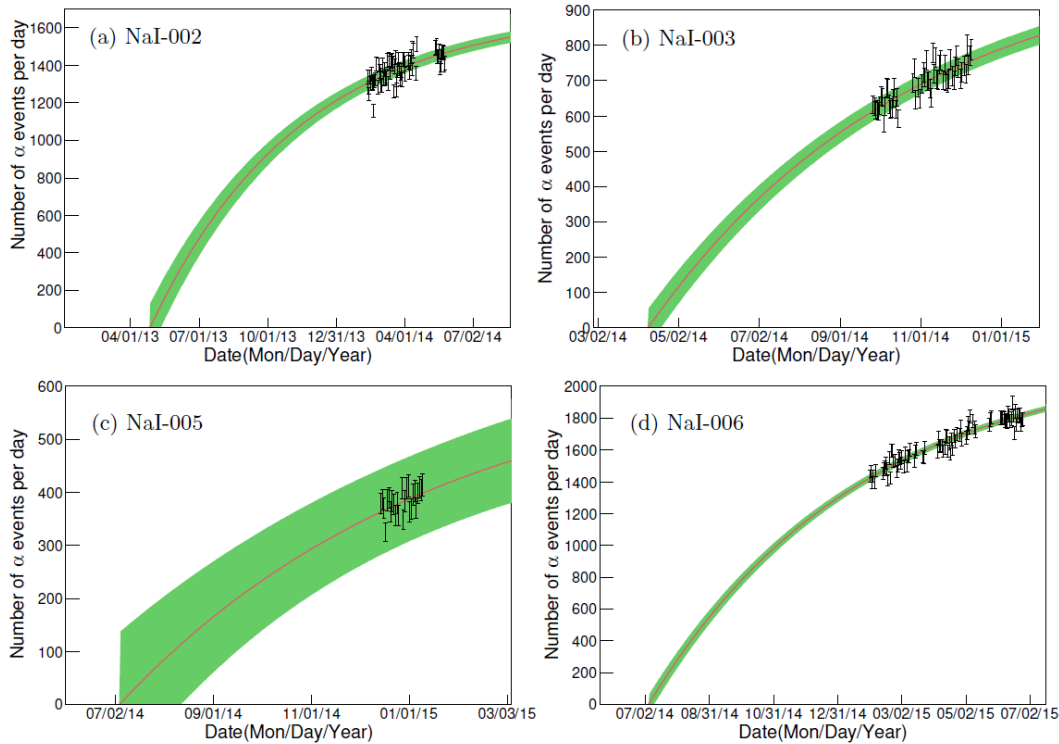


Fig. 2. (Color online) The increase in alpha activities is fitted to a model which assumes a single, instantaneous  $^{210}\text{Po}$  contamination event occurred for each crystal: (a) NaI-002, (b) NaI-003, (c) NaI-005, and (d) NaI-006. Since the event sample in the NaI-006 crystal contains additional  $\alpha$  events from the substantial  $^{232}\text{Th}$  contamination, the best fit date precedes the crystal growth date.

고순도의 검출기를 만들기 위해서는 검출기 내부의 배경 방사능을 정확하게 이해하는 것이 필수적이다. Table 2는 KIMS 그룹이 개발한 6개 NaI 섬광 검출기의 내부 방사능 측정 결과를 보여준다. 이 가운데 WIMP 탐색에 문제가 되는 배경 방사능 중의 하나가 바로  $^{40}\text{K}$ 이다.  $^{40}\text{K}$ 는 1460 keV의  $\gamma$ 와 함께 3 keV의 X-ray가 동시에 방출된다. 이때 높은 에너지의  $\gamma$ 가 검출기에서 반응하지 않고 탈출하면 NaI 검출기는 3 keV의 낮은 에너지 신호를 가지게 되어 암흑물질 신호로 오인될 수 있다. DAMA/LIBRA 실험의 경우  $^{\text{nat}}\text{K}$ 의 양이 검출기마다 다르지만 대략 10–20 ppb 정도의 순도를 가진다. 이에 반해 KIMS에서 초기에 개발했던 검출기는 대략 40 ppb 내외의 불순물을 함유하였으나 순도를 높은 파우더 (Sigma Aldrich사의 Astro-Grade powder)를 사용하여 이를 절반으로 줄일 수 있었다. 특히 ICP-MS 장비를 사용해 파우더와 결정검출기의  $^{40}\text{K}$  양을 측정하였을 때 Table 2와 같이 매우 잘 비례하는 관계를 얻었다. 이에 파우더의 순도를 더욱 높이려는 노력을 진행하여 10–20 ppb 레벨의 불순물을 가지는 파우더를 생산하였다. 이 파우더를 사용하여 제작한 섬광 검출기는 DAMA/LIBRA와 비슷한  $^{40}\text{K}$  양을 가지고 있다.

$^{238}\text{U}$  과  $^{232}\text{Th}$  는 반감기가 길어 자연계에 매우 많은 양이 존재한다. 그러나 검출기 내부의 알파입자 붕괴를

통해 측정된  $^{238}\text{U}$  과  $^{232}\text{Th}$  의 양은 Table 2와 같이 매우 작았다. 이 값은 DAMA/LIBRA 검출기와 대소동일한 수준이다. 이에 반해 총 알파붕괴의 양은  $^{238}\text{U}$  과  $^{232}\text{Th}$  로는 전혀 설명할 수 없이 많았다. 이는 공기 중에 존재하는  $^{222}\text{Rn}$  의 오염에서 발생한  $^{210}\text{Po}$  의 붕괴로 설명할 수 있다.  $^{222}\text{Rn}$  붕괴과정에서  $^{210}\text{Po}$ 는  $^{210}\text{Pb}$ 의 베타 붕괴에서 발생하고, 알파붕괴를 통해  $^{206}\text{Pb}$ 로 다시 붕괴한다. 이때  $^{210}\text{Pb}$ 의 반감기가 22년으로 길기 때문에 만약 특정 시간에  $^{222}\text{Rn}$  오염이 있었다면  $^{210}\text{Po}$ 의 알파붕괴는 반감기 200일의 시간 함수로 증가하게 된다. 각 검출기의 알파 붕괴의 양을 시간에 대한 함수로 그린 다음 200일의 시간 함수로 fit을 하면 Fig. 2 같이 매우 잘 기술되어 이러한 가정이 옳다는 것이 증명되었다.

이에 파우더부터 결정성장 등 모든 과정에서  $^{222}\text{Rn}$ 에 의한 오염을 줄이기 위해 노력을 기울였고 NaI-005와 같이 총 알파붕괴의 양이 다른 검출기에 비해 3배 정도 작은 검출기를 개발할 수 있었다.  $^{222}\text{Rn}$ 에 의한 오염이 파우더에 이미 존재할 가능성도 있어서 파우더를 정제하는 방법을 개발하여 순도 높은 파우더를 제작하는 노력을 기울이고 있다.

외부 방사능과 내부 감마 붕괴에 의한 배경 방사능을 줄이기 위해 NaI 검출기를 액체 섬광 검출기에 넣어 컴프톤억



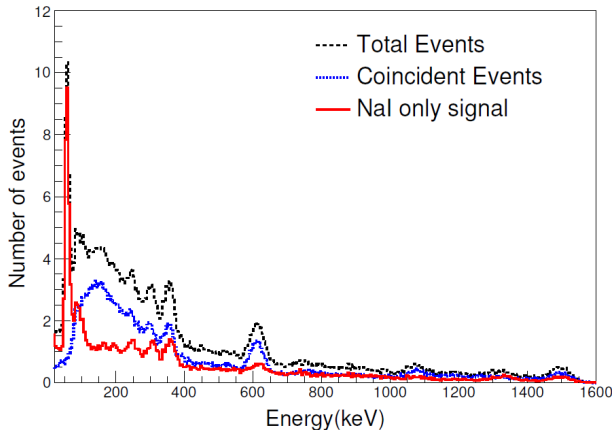


Fig. 3. (Color online) Background energy spectrum of NaI-002 in the LS veto system. Vetoed events (blue dotted line) have hits on LS veto with energy greater than 10 keV while Hit of NaI only (red solid line) events have no such hits on LS veto detector. Total hit (black dashed line) is all events summing two categories.

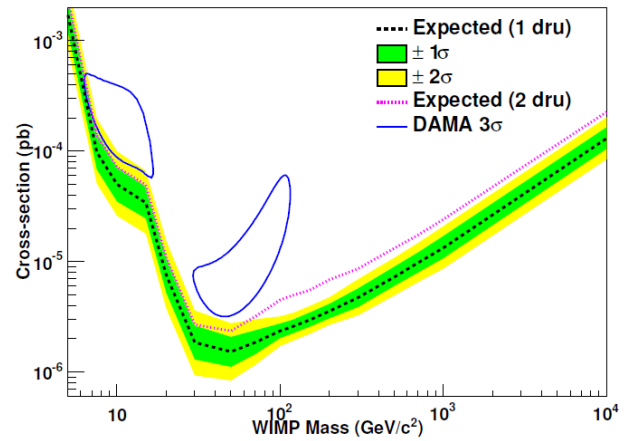


Fig. 5. (Color online) The median expected (black dotted line) 90% CL upper limit on the WIMP-nucleon spin-independent cross-section assuming the background-only hypothesis, shown together with WIMP-induced DAMA/LIBRA 3 $\sigma$ -allowed region (solid contour). The dark (green) and light (yellow) shaded bands indicate the 1 $\sigma$  and 2 $\sigma$  standard deviation probability regions in which the limits are fluctuated. The red dotted line indicates the median expected limit assuming 2 dru background level.

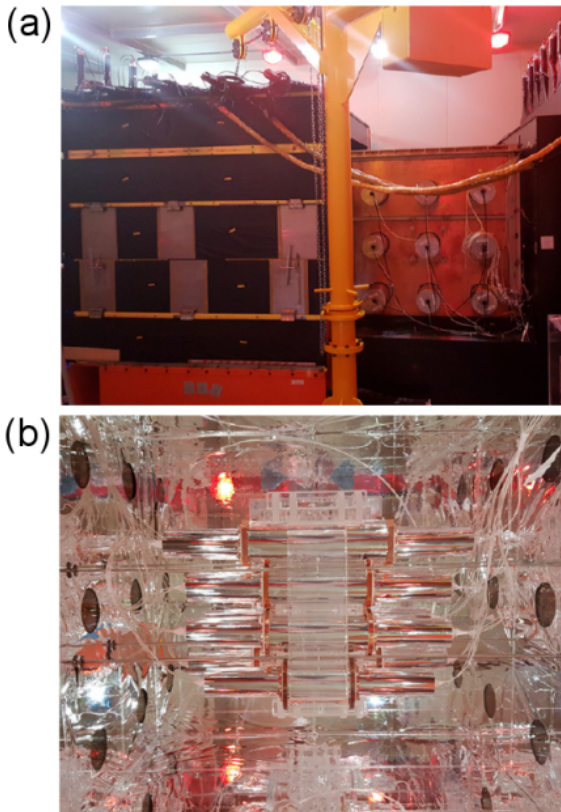


Fig. 4. (Color online) (a) The shield of COSINE-100 experiment consisted with 3 cm plastic scintillator, 20 cm lead, 3 cm copper, 40 cm liquid scintillator from outside to inside. (b) Eight NaI crystals installed inside of shielding for COSINE-100 experiment.

제체로 사용하는 테스트를 진행하였다. Geant4를 이용한 시뮬레이션에 의하면 검출기 외부의 U,Th,K에 의한 배경

방사능은 70% 이상 차폐가 됨을 확인하였다. 또한, 내부  $^{40}\text{K}$  붕괴에 의한 방사능도 1460 keV 감마를 액체 섬광체에 검출하여 제거할 수 있다. Fig. 3는 NaI-002 검출기를 액체 섬광체에 담가 실험한 결과를 보여준다. 100 keV 이상의 영역에서 60% 이상의 이벤트가 액체 섬광체에 신호를 남겨 제거할 수 있었다. 이 시설은 DAMA/LIBRA 실험에는 없는 장치로 추가적인 방사능 제거가 가능하여 DAMA/LIBRA와 같은 고성능 검출기 구현에 큰 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

KIMS 그룹은 상기 논의한 R&D 과정을 통해 50 kg 가량의 고순도 NaI 검출기를 확보하였다. 검출기 개발 과정에서 밀접하게 협력하였던 미국의 DM-Ice 그룹과 스페인의 ANAIS 그룹과 공동연구를 위한 협의를 꾸준히 진행하였고, 이 과정에서 DM-Ice 그룹은 KIMS 그룹과 함께 양양에서 암흑물질 탐색 실험을 진행하기로 하였다. DM-Ice 그룹이 대략 50 kg 가량의 NaI 검출기를 확보하여 100 kg의 결정을 이용한 첫 실험이 당장 가능하다. 이 실험은 COSINE-100로 명명하여 실험실 건설 검출기 설치 등을 진행하였다. 양수발전소의 도움을 받아 유희터널을 이용하여 NaI 실험을 위한 공간을 확보하고 납, 구리, 광물기름을 이용해 Fig. 4와 같이 차폐체와 검출기 설치를 완료하였다. 현재 액체 섬광체를 채우지 않은 상태로 전체 시스템 점검을 위한 테스트 실험을 진행하고 있다. 곧 액체 섬광체를 채우고 실험이 시작되면 DAMA/LIBRA 신호에 대한 이해를 증진할 수 있을 것으로 기대한다.

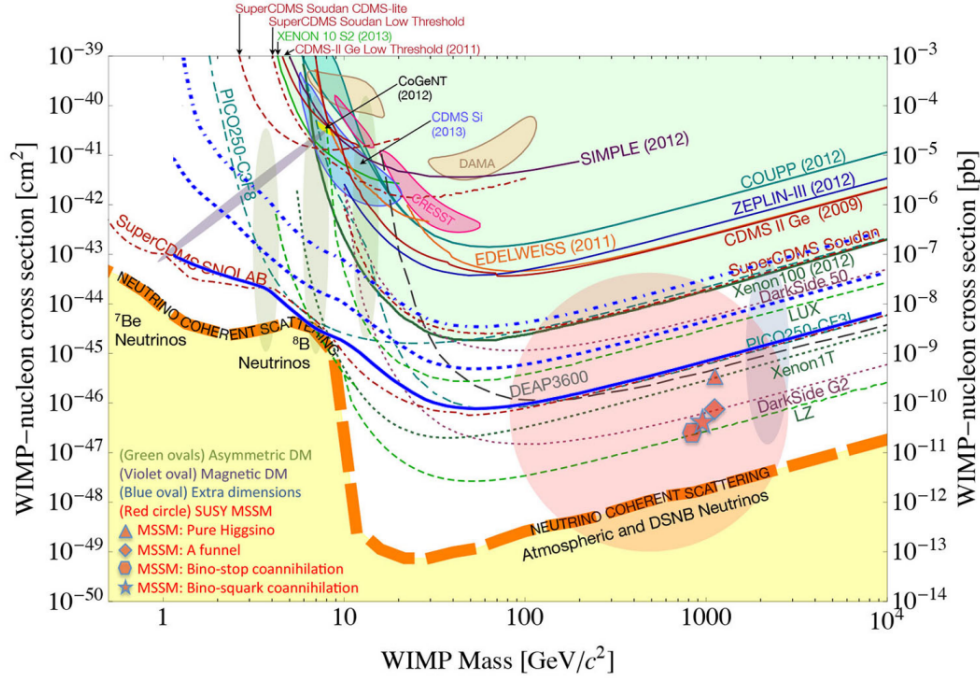


Fig. 6. (Color online) The sensitivity of KIMS-LT (blue solid line assuming 250 kg  $\text{CaMoO}_4$  crystal with 0.01 dru background, and one year operation) are compared with world-leading experiments' limits and sensitivities.

이와 더불어 NaI 검출기의 배경방사능을 더욱 낮추기 위한 노력도 계속 진행 중이다.  $^{40}\text{K}$ 의 경우 이미 그 순도가 20 ppb 이하로 신포형역에서 0.1 dru 이하의 배경 방사능을 준다.  $^{210}\text{Pb}$ 의 경우 파우더의 화학적인 정제, 결정성장과정에서 Rn 접촉 제거, 그리고, 검출기 제작 설치 과정에서 공기접촉을 차단하는 등의 과정을 통해 NaI-005 검출기보다 3배 이하의 함유량을 달성할 것으로 기대한다. 이 경우 총 내부방사능에 의한 백그라운드는 0.5 dru 이하가 된다. 또 액체 섬광체를 이용하여 외부 방사능을 제거하면 총 배경방사능이 1 dru 이하 즉, DAMA/LIBRA 보다 우수한 성능의 검출기를 확보할 수 있다. Fig. 5과 같이 2-3년 실험을 통해 DAMA/LIBRA 결과에 대해 이견 없는 결론을 내릴 수 있을 것이다.

#### IV. KIMS 저온 검출기 실험

KIMS-NaI 실험이 DAMA/LIBRA의 결과를 검증하는 매우 중요한 실험이지만 표준적인 우주 모형과 WIMP 모델을 고려했을 때 WIMP 신호 검출에 대한 민감도는 다른 세계 유수의 실험들에 비해 떨어진다고 볼 수 있다 [35]. 그 이유는 고전적인 섬광 검출기의 PSD 능력이 두 개의 다른 섬광 신호를 관측하는 액체 Xenon 검출기나 포논과 섬광 (혹은 전자-양공 쌍)을 동시에 검출하는 저온 검출기에 비해

매우 떨어지기 때문이다. 따라서 세계 유수의 WIMP 탐색 실험들과 경쟁하기 위해서는 WIMP 탐색에 특화된 새로운 검출기의 개발이 필수적이다.

본 연구진은 중성미자 미방출 이중베타 실험을 위해  $\text{CaMoO}_4$  결정을 이용한 저온 검출기의 개발을 활발히 진행하고 있다 [36,37]. 포논 센서와 빛 센서가 이미 개발되어 테스트 되었고 [38-40], 이를 이용한 WIMP 탐색을 계획하고 있다. 이 검출기가 구현되면 포논 신호와 빛 신호의 비율을 이용해 WIMP-핵반응을 매우 높은 효율로 배경방사능과 구분할 수 있다. 이는  $\text{CaWO}_4$  결정을 저온 검출기로 사용하는 CRESST 실험 [41,42]과 유사한 개념이다. 본 연구단은 세계적인 수준의 포논 검출기를 이미 개발하여 양양 지하실험실에서 이중베타 붕괴 실험을 진행하고 있다. 또한, 독일 Heidelberg 대학과 협력을 통해 빛 검출기의 성능향상을 추진하고 있다. 향후 2-3년 이내에 빛 센서의 성능을 향상한다면 현재 CRESST 검출기보다 더욱 고성능의 검출기를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

세계 최고의 암흑물질 실험을 위해서는 검출기 내외부의 방사능을 극도로 낮추는 것이 필수적이다. KIMS 연구진은 이미 CsI NaI 검출기의 내부 방사능을 세계 최저수준으로 낮추는 연구를 진행하며 기술을 축적하였다. 또한,  $\text{CaMoO}_4$  결정의 순도를 높이기 위해 원 물질인  $\text{CaCO}_3$ 와  $\text{MoO}_3$  파우더의 U, Th, Ra등을 화학적인 방법으로 제거하는 연구를 진행 중이다. 또한, NaI 파우더에서  $^{210}\text{Pb}$ 를

제거하는 연구를 진행하여 기술을 획득하고 있다. 이를 통해 저온실험에 사용할 검출기의 내부배경 방사능을 극도로 낮출 수 있을 것으로 기대한다. 만약 검출기의 성능이 CRESST 실험에 도달하고 내부배경방사능을 0.01 dru까지 낮출 수 있다면 Fig. 6과 같이 세계 유수의 WIMP 탐색 실험과 경쟁이 가능하다. 특히 낮은 질량의 WIMP 탐색에서 세계 최고 민감도의 실험을 수행할 수 있다.

## V. 결론

KIMS 실험 그룹은 지난 15년간 CsI, NaI 결정 검출기를 개발하고 암흑물질 탐색을 진행하여 왔다. 극미량의 방사선 원인을 측정하고 또 제거하여 극저 배경방사능 검출기의 제작 노하우를 축적하였다. 이를 통해 짧게는 DAMA/LIBRA 실험 결과에 이견 없는 결론을 내리고, 길게는 세계 최고 수준의 저온 검출기를 개발하여 낮은 질량의 암흑물질 탐색에 세계 최고의 감도를 가지는 실험을 목표로 하고 있다. 본 연구진의 이러한 노력이 암흑물질을 이해하는데 조금이나마 진전을 줄 수 있기를 기대한다.

## 감사의 글

KIMS 실험을 수행하기 위해 필수적인 지하 실험실을 제공해준 한국수력원자력과 양양 양수발전소 관계자 여러분께 감사드립니다. 본 논문의 결과를 얻고 또 앞으로 암흑물질 탐색의 성과를 위해 밤낮없이 연구하고 있는 KIMS 그룹 연구진에게 감사드립니다. 본 연구는 기초과학연구원의 IBS-R016-D1 프로젝트와 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2011-35B-C00007)을 받아 수행된 기초연구사업입니다.

## REFERENCES

- [1] M. Persic, P. Salucci and F. Stel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **208**, 27 (1996).
- [2] D. Clowe, A. Gonzalez and M. Markevitch, *Astrophys. J.* **604**, 596 (2004).
- [3] D. Larson, J. Dunkley, G. Hinshaw, E. Komatsu and M. R. Nolta *et al.*, (WMAP Collaboration), *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 16 (2011).
- [4] P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud and M. Ashdown *et al.*, (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **571**, A16 (2014).
- [5] G. R. Blumenthal, S. M. Faber, J. R. Primack and M. J. Rees, *Nature* **311**, 517 (1984).
- [6] B. W. Lee and S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 165 (1977).
- [7] G. Jungman, M. Kamionkowski and K. Griest, *Phys. Rep.* **267**, 195 (1996).
- [8] R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, V. Caracciolo and S. Castellano *et al.*, (DAMA/LIBRA Collaboration), *Eur. Phys. J. C.* **73**, 2648 (2013).
- [9] R. Agnese *et al.*, (SuperCDMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **112**, 241302 (2014).
- [10] D. S. Akerib *et al.*, (LUX Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 161302 (2016).
- [11] E. Aprile *et al.*, (XENON100 Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **109**, 181301 (2012).
- [12] H. J. Kim, H. J. Ahn, S. K. Kim, E. Won and T. Y. Kim *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **457**, 471 (2001).
- [13] H. S. Lee, H. Bhang, I. S. Hahn, M. J. Hwang and H. J. Kim *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **571**, 644 (2007).
- [14] S. K. Kim, H. J. Kim and Y. D. Kim, *New J. Phys.* **12**, 075003 (2010).
- [15] H. S. Lee, H. Bhang, J. H. Choi, I. S. Hahn and D. He *et al.*, (KIMS Collaboration), *Phys. Lett. B* **633**, 201 (2006).
- [16] H. S. Lee *et al.*, (KIMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **99**, 091301 (2007).
- [17] S. C. Kim, H. Bhang, J. H. Choi, W. G. Kang and B. H. Kim *et al.*, (KIMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **108**, 181301 (2012).
- [18] H. S. Lee *et al.*, (KIMS Collaboration), *Phys. Rev. D* **90**, 052006 (2014).
- [19] K. W. Kim, W. G. Kang, S. Y. Oh, P. Adhikari and J. H. So *et al.*, (KIMS-NaI Collaboration), *Astropart. Phys.* **62**, 249 (2015).
- [20] H. S. Lee, G. Adhikari, P. Adhikari, S. Choi and I. S. Hahn *et al.*, (KIMS-NaI Collaboration), *J. High Energy Phys.* **08**, 093 (2015).
- [21] P. Adhikari, G. Adhikari, S. Choi, C. Ha and I. S. Hahn *et al.*, (KIMS-NaI Collaboration), *Eur. Phys. J. C* **76**, 185 (2016).
- [22] Y. D. Kim, U. K. Kang, J. M. Choi, H. K. Jang and R. K. Jain *et al.*, *J. Korean Phys. Soc.* **40**, 520 (2002).

- [23] T. Y. Kim, I. S. Cho, D. H. Choi, J. M. Choi and I. S. Hahn *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*500\*\*, 337 \(2003\)](#).
- [24] Y. D. Kim, I. S. Hahn, M. J. Hwang, L. Jin and W. G. Kang *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*552\*\*, 456 \(2005\)](#).
- [25] H. Park, D. H. Choi, J. M. Choi, I. S. Hahn and M. J. Hwang *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*491\*\*, 460 \(2002\)](#).
- [26] H. S. Lee, H. Bhang, J. H. Choi, S. Choi and I. S. Hahn *et al.*, [JINST \*\*9\*\*, P11015 \(2014\)](#).
- [27] C. Arina, E. D. Nobile and P. Panci, [Phys. Rev. Lett. \*\*114\*\*, 011301 \(2015\)](#).
- [28] R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, V. Caracciolo and R. Cerulli *et al.*, [EPJ Web Conf. \*\*70\*\*, 00043 \(2014\)](#).
- [29] J. Amare, S. Cebrián, C. Cuesta, E. García and C. Ginestra *et al.*, (ANAIS Collaboration) [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*742\*\*, 187 \(2014\)](#).
- [30] J. Amare, S. Cebrián, C. Cuesta, E. García and C. Ginestra *et al.*, (ANAIS Collaboration) [J. Cosmol. Astropart. Phys. \*\*1502\*\*, 046 \(2015\)](#).
- [31] J. Cherwinka, D. Grant, F. Halzen, K. M. Heeger and L. Hsu *et al.*, (DM-Ice Collaboration), [Phys. Rev. D \*\*90\*\*, 092005 \(2014\)](#).
- [32] E. B. Souza *et al.*, (DM-Ice Collaboration), [arXiv:1602.05939 \(2016\)](#).
- [33] K. I. Fushimi *et al.*, [arXiv:1605.04999 \(2016\)](#).
- [34] J. Xu, F. Calaprice, F. Froberg, E. Shields and B. Suerfu *et al.*, [AIP Conf. Proc. \*\*1672\*\*, 040001 \(2015\)](#).
- [35] P. Cushman *et al.*, [arXiv:1310.8327 \(2013\)](#).
- [36] S. J. Lee, J. H. Choi, F. A. Danevich, Y. S. Jang and W. G. Kang *et al.*, [Astropart. Phys. \*\*34\*\*, 732 \(2011\)](#).
- [37] G. B. Kim, S. Choi, F. A. Danevich, A. Fleischmann and C. S. Kang *et al.*, [Adv. High Energy Phys. \*\*2015\*\*, 817530 \(2015\)](#).
- [38] W. S. Yoon, C. S. Kang, S. R. Kim, G. B. Kim and H. J. Lee *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*784\*\*, 143 \(2015\)](#).
- [39] G. B. Kim, S. Choi, Y. S. Jang, H. J. Kim and Y. H. Kim *et al.*, [J. Low Temp. Phys. \*\*176\*\*, 637 \(2014\)](#).
- [40] H. J. Lee, J. H. So, C. S. Kang, G. B. Kim and S. R. Kim *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A \*\*784\*\*, 508 \(2015\)](#).
- [41] G. Angloher, A. Bento, C. Bucci, L. Canonica and A. Erb *et al.*, (CRESST Collaboration), [Eur. Phys. J. C \*\*74\*\*, 3184 \(2014\)](#).
- [42] R. Strauss, G. Angloher, A. Bento, C. Bucci and L. Canonica *et al.*, (CRESST Collaboration), [J. Cosmol. Astropart. Phys. \*\*1506\*\*, 030 \(2015\)](#).